

Análisis no destructivo del estado de degradación en morteros bajo la acción de ciclos hielo-deshielo

E. MENÉNDEZ¹, J. DE FRUTOS², C. ANDRADE¹

¹Instituto de Ciencias de Construcción "Eduardo Torroja" (CSIC) c/ Serrano Galvache, 4 – 28033 Madrid

²POEMMA R&D Group. ETSIT-UPM. Ciudad Universitaria, s/n 28040 Madrid.

En el presente trabajo se evalúan diferentes morteros, con distinto grado de daño por la acción de ciclos de hielo-deshielo, analizando su estado mediante diferentes métodos de evaluación habituales. Los resultados obtenidos por estos métodos se comparan con un análisis mediante la técnica de espectroscopía de impedancia, analizándose la capacidad de esta técnica para evaluar el estado de los morteros y el grado de daño interno producido.

Palabras clave: Ensayos no destructivos, fatiga, propiedades eléctricas Hielo-Deshielo, módulo dinámico relativo

Evaluation by means of non destructive techniques to deterioration of mortars due to cycles freeze-thawing

In this paper we evaluate different mortars, with varying degrees of damage by the action of ice-thawing cycles, and analyzing their status through various methods to assess usual. The results obtained by these methods are compared to an analysis by means of the technique of impedance spectroscopy and we analyzed the ability of this technique to assess the state of mortars and degree of internal damage occurred

Keywords: Non destructing testing, aging, electrical properties, freeze-thawing

1. INTRODUCCIÓN

Se podría pensar que el mantenimiento y la durabilidad de las estructuras de cemento y sus derivados es algo bien conocido. Desgraciadamente no es así, hasta el punto de que este tema tiene vital importancia a una escala universal y de enormes proporciones. Universal, porque el cemento es, sin lugar a dudas, el material de construcción más ampliamente usado en todo el mundo, y de enormes proporciones, porque el costo del mantenimiento, reparación y rehabilitación, en dinero gastado o que debe ser gastado, alcanza anualmente billones de euros, superando en los países desarrollados en media, el 4 % del producto interior bruto y llegando en algunos de ellos a superar el 7 %. (1-5)

El aspecto más determinante en este proceso de durabilidad es la aparición de grietas en el material debido fundamentalmente a efectos medioambientales (5-7). Estas grietas reducen las propiedades mecánicas del cemento y permiten la penetración de fluidos en los mismos, y en consecuencia, se disminuye de forma dramática la vida media del cemento y la vida útil de estos materiales.

El comportamiento del mortero con relación a las acciones agresivas está condicionado por el transporte de sustancias en el interior de la fase porosa, siendo los parámetros más importantes, relativos al transporte de sustancias en el interior de los poros, la porosidad global y la distribución del tamaño de poros (8). En el caso de deterioro asociado a ciclos hielo-deshielo (8-12), el deterioro mecánico del mortero está

relacionado con su naturaleza porosa y con el aumento de un 9% en volumen que experimenta el agua cuando se convierte en hielo. Este aumento de volumen producido no puede ser asumido por el material, cuya resistencia a tracción es superada, y las grietas aparecen para liberar las tensiones producidas. Durante el proceso de congelación el agua sufre incremento de volumen y durante el enfriamiento se produce un proceso de difusión, por lo que es conveniente la existencia de un número suficiente de poros que no estén saturados, para permitir que la expansión se produzca sin deterioros.(8,9)

Ahora bien, el valor límite de contenido de agua que puede producir deterioro en un mortero es función del grado de saturación existente en el material y está afectado por los siguientes factores (8,11):

- La edad del mortero, que está directamente relacionado con el grado de hidratación y la estructura de la red porosa.
- La distribución y tamaños de poros.
- Las condiciones medioambientales.
- La velocidad de enfriamiento y la frecuencia de los ciclos de hielo-deshielo, y su consecuencia sobre la redistribución del agua.
- La posible desecación del material entre los ciclos de hielo-deshielo, que afectaría directamente a la existencia de espacios de expansión adicional.

A esto hay que añadir como se altera este proceso por otro tipo de factores como el grado de saturación, aire ocluido, dosificación del mortero, influencia de los áridos, condiciones medioambientales y edad del mortero.

En las pasadas décadas, el uso de la Espectroscopía de Impedancias (EIS) en diversos campos de estudio para estos materiales, ha demostrado su potencialidad y en concreto, en la capacidad de determinar la microestructura de los mismos. [12–17]. En otros trabajos, [18–21], se han propuesto modelos eléctricos para explicar la respuesta de estos materiales, de forma similar a como se ha planteado tradicionalmente para materiales electrocerámicos y semiconductores. El modelo más generalmente propuesto está formado por un circuito RC paralelo, con una Resistencia en serie R_0 . Se dan diferentes interpretaciones al valor medido de R_0 a altas frecuencias. Por ejemplo Christensen y col. [17] definen R_0 como una Resistencia de compensación que tiene sentido únicamente para ajustar los datos. Por su parte Gu y col. [21] consideran en un primer modelo que R_0 es la Resistencia correspondiente al cemento no hidratado y a los productos de hidratación y en un segundo modelo a la Resistencia de la disolución en poros.

Las argumentaciones anteriores para explicar el espectro de EIS en altas frecuencias dan lugar a modelos que no responden al comportamiento del material ni a la microestructura del mismo. Adicionalmente se han propuestos varios modelos [14,17,22–24] por diferentes investigadores no demasiado convincentes para interpretar la respuesta eléctrica de la pasta de cemento, hormigones o morteros. Por ejemplo, Whittington y col. [19] propusieron un modelo de conducción del cemento que consideraba tres posibles vías de conducción correspondientes a los agregados, a la pasta y a la mezcla pasta-agregados. Modelo que es difícil de aplicar puesto que es muy poco probable que exista con los agregados, y en la práctica, al menos haya una fina capa de cemento entre ellos. Los modelos multicapa [14] y ladrillo [17] parece que ayudan a interpretar algunos resultados de EIS. No obstante, incluso en los casos más favorables, se observa que hay aspectos como la fuerte dependencia de la resistividad con la corriente o el potencial eléctrico aplicado que dificultan la explicación de los resultados. De forma similar, el modelo “T” [21] puede utilizarse para explicar la amplificación dieléctrica de los sistemas cementicios pero si se utiliza para describir la respuesta de EIS, en teoría, se obtendrá que la resistividad del cemento será dependiente de la corriente. Comparando el modelo de “T”, con el modelo de huecos y barreras de potencial de Ford y col. [25] se han conseguido reproducir y explicar algunos de los resultados de EIS.

Otros modelos como el presentado por Macphee y col. [22] presentan circuitos equivalentes más complicados, en los que incluye múltiples caminos de conducción posibles,

continuidad de poros, discontinuidad de poros, productos de hidratación, cemento que no ha reaccionado, agregados... etc. Puesto que las principales rutas conductoras se mezclan con otras levemente conductoras, como las regiones con cemento que no ha reaccionado, que contribuyen muy poco a la corriente de conducción, hace que resulte muy complicado obtener valores de R y C que se relacionen con la microestructura individual, haciendo que el modelo sea prácticamente inviable e incluso Cormack y col. [24] sugirieron que la interpretación inicial [23] del comportamiento EIS basado en este modelo es incorrecta. Por su parte, Song (27) ha propuesto un modelo simplificado que proporciona un buen acuerdo con la microestructura del material, y más recientemente Koleva et al (28, 29), propusieron un modelo que ayuda a entender la relación entre la microestructura, las propiedades eléctricas y los fenómenos electroquímicos en morteros reforzados.

Todo lo anterior pone de manifiesto lo difícil de modelizar la respuesta eléctrica de estos materiales, y al mismo tiempo la fuerte dependencia de los mismos con la corriente o tensión aplicados. En este trabajo el objetivo no es tanto determinar modelos de comportamiento eléctrico para el material, como modelizar la evolución de la respuesta eléctrica del mismo y su relación con la pérdida de propiedades mecánicas. Así, se efectuará una adaptación de estos modelos al estudio de los morteros, hormigones y pastas de cemento, pero considerando que durante los procesos de degradación debidos a la acción de ciclos hielo-deshielo, es de esperar que se modifique la microestructura del material, en especial su red porosa, y en consecuencia su respuesta eléctrica. Se estudiarán estos cambios y su relación con las propiedades mecánicas y de resistencia obtenidos por métodos convencionales con el objetivo de determinar en qué punto se inicia el deterioro del material, y en cual pierde su funcionalidad.

En este trabajo se han estudiado los morteros, fabricados con y sin adición de cenizas volantes y éstas a su vez con diferentes valores de pérdida al fuego.

2. MATERIALES Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS

En el presenta trabajo se han estudiado diferentes morteros, fabricados con y sin adición de cenizas volantes. Se han utilizado dos tipos diferentes de cenizas volantes con diferente pérdida al fuego, que se traduce en una diferente sensibilidad a la acción de los ciclos hielo-deshielo.

Los morteros fabricados con y sin adición de ceniza volante han sido sometidos a 56 ciclos de hielo-deshielo, ensayándolos periódicamente por distintos métodos, considerados como clásicos (8), con el fin de analizar el estado de deterioro de cada tipo de mortero.

También, se ha realizado una caracterización periódica

TABLA 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO CEM I 42,5 R.

P.F.	R.I.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O ₃	K ₂ O	CaO libre
3,44	0,76	19,42	6,13	2,07	63,18	1,83	2,28	0,28	1,23	1,66

TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS CENIZAS VOLANTES.

Ceniza	SiO ₂ Total	SiO ₂ Reactiva	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO Total	P.F.
1	44,62%	40,12%	24,79%	12,04%	7,04%	5,51%
2	44,08%	38,95%	23,63%	11,43%	8,57%	4,77%

mediante técnicas de impedancia compleja, analizándose las modificaciones sufridas por los materiales y comparando los datos obtenidos con los métodos clásicos de ensayo.

Materiales para la fabricación de las probetas de mortero: Los materiales utilizados para la fabricación de los morteros son los siguientes: Cemento CEM I 42,5 R; Ceniza 1, Ceniza volante (pérdida al fuego comprendida entre el 5% y el 7%); Ceniza 2, Ceniza volante (pérdida al fuego menor (P.F.) del 5%) y Arena Silícica (> 95 % cuarzo).

La composición química del cemento aparece en la Tabla 1 y la composición química de las cenizas en la Tabla 2.

• **Fabricación de probetas de mortero:** Se fabricaron probetas de mortero con cementos con diferentes proporciones de cenizas volantes y sin cenizas volantes, éstas últimas se consideran como material de referencia y, en principio, dadas las características del material deberían presentar un menor deterioro por la acción de los ciclos de hielo-deshielo.

Los morteros se fabricaron de acuerdo con la siguiente dosificación: Relación agua/cemento = 1/2; Relación árido/cemento = 3/1; Curado en cámara a 96% de humedad relativa y 20 ± 2 °C, durante 24 horas; Dimensión de las probetas: 4x4x16 centímetros.

Se fabricaron cinco tipos de morteros con los cementos y adiciones de cenizas en los mismos según lo recogido en la Tabla 3. Además, en función de las cenizas utilizadas, denominamos Cemento A cuando se utilizan cenizas de pérdida al fuego entre 5 % y el 7 %, y Cemento B cuando se utilizan cenizas de pérdida al fuego menor del 5 %.

Ensayo de hielo-deshielo: Los distintos morteros se ensayaron a ciclos de hielo-deshielo de acuerdo con las normas de ensayo.

Acondicionamiento de probetas antes del ensayo: Una vez desmoldadas las probetas, éstas son curadas bajo agua durante 7 días a una temperatura de 20 ± 2 °C. Posteriormente se colocan en una cámara climática durante 21 días en condiciones de 20 ± 2 °C de temperatura y humedad relativa del 65 ± 5 %.

Después del acondicionamiento las probetas de referencia se mantienen en condiciones idénticas a las de ensayo, pero sin ser sometidas a ciclos hielo-deshielo, mientras que probetas de ensayo son sometidas hasta un total de 56 ciclos de hielo-deshielo.

Ciclo de hielo-deshielo: El ciclo dura 24 horas, en este tiempo la parte interna de la probeta está por encima de 0 °C, al menos, 7 horas y no más de 9 horas. La temperatura inferior del

ciclo será de -20 ± 2 °C y la superior de 20 ± 4 °C, mientras que el periodo de congelación será de 16 horas y el de descongelación de 8 horas.

En la Figura 1 aparece el esquema del ciclo tiempo-temperatura en el centro de la superficie sometida a ensayo en el medio de congelación. La zona sombreada corresponde al rango de temperaturas en que se mantiene la muestra para que cumpla la norma de ciclos hielo-deshielo (8).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Varios son los parámetros que inciden sobre la heladicidad de los morteros. Unos son debidos a las condiciones ambientales y otros a las propias características del material. En cuando a las condiciones ambientales resultan de importancia dos factores: la temperatura mínima que se alcanza y la frecuencia de ocurrencia de los ciclos.

En los distintos métodos de ensayo clásicos, para la determinación de la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo, que se utilizan hay que destacar por una parte el aspecto de daño superficial que puede observarse y, por otra parte, la evaluación del daño interno que se produce en el interior del material.

Existen diversas Normas y métodos de ensayo desarrollados con el fin de evaluar la resistencia frente a los ciclos de hielo-deshielo (8). Estos métodos presentan distintas características tanto en el método de ensayo como en la evaluación del daño. El método principal para determinación de daño interno, utilizado habitualmente, es la modificación del módulo dinámico relativo, mediante medidas de ultrasonidos(8).

Además, de estos métodos de determinación de daño interno, se ha desarrollado el método de impedancia compleja, con el fin de analizar la potencialidad de esta técnica para la determinación del daño interno del material. La potencialidad de esta técnica es enorme, puesto que ha de permitir determinar tanto el grado de deterioro como la posible causa del mismo y su localización en el cemento, en las uniones cemento-árido o cemento-escoria, o en el interior tanto del cemento como de la escoria.

Al mismo tiempo ha de permitir determinar contenidos

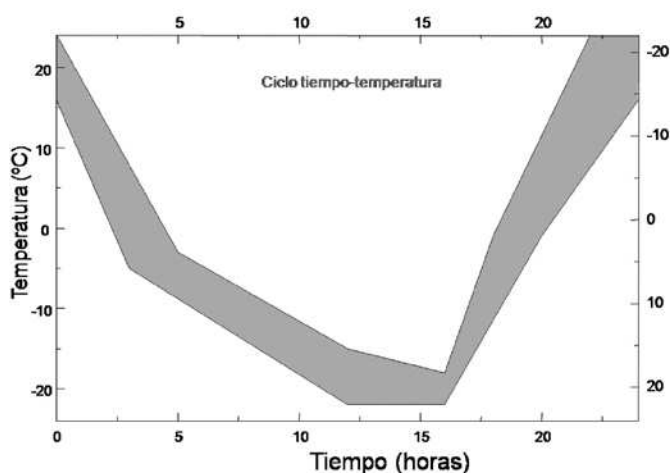


Figura 1. Secuencia de temperatura en un ciclo hielo-deshielo.

TABLA 3. MATERIALES Y TIPOS DE CEMENTOS.

Denominación del mortero	Tipo de cemento	CEM I 42,5 R	Ceniza volante
Mortero 1	CEM I 42,5	100 %	0 %
Mortero 2	CEM II/B (V)	72 %	28 %
Mortero 4	CEM IV/B (V)	54,5 %	45,5 %

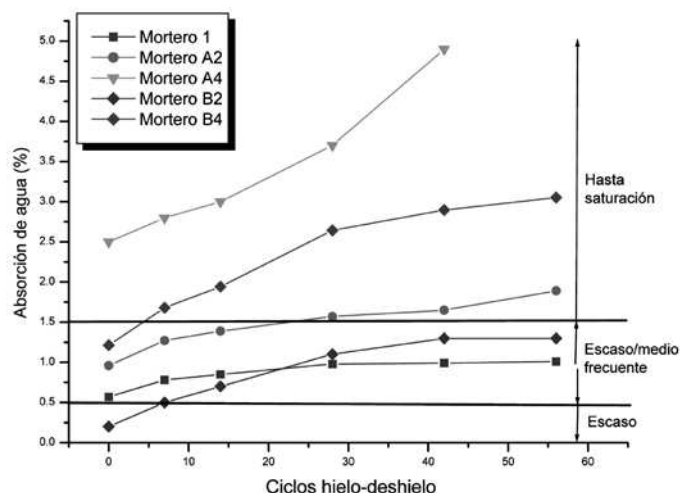


Figura 2. Absorción de agua durante los ciclos hielo-deshielo.

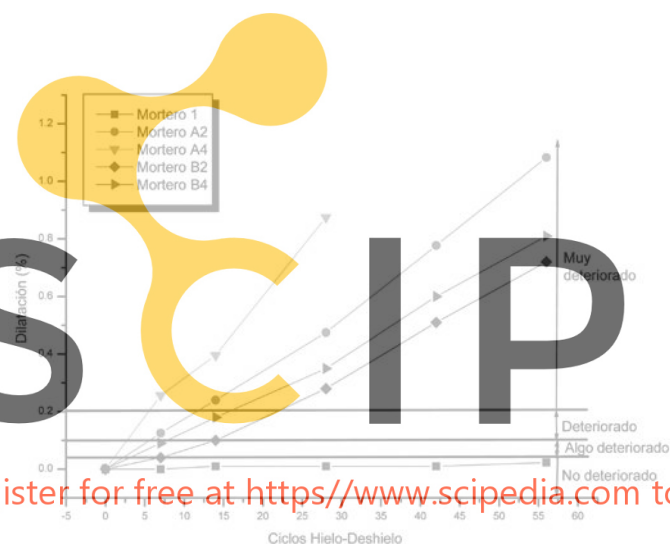


Figura 3. Cambios dimensionales durante los ciclos hielo-deshielo.

de agua y o bien la adsorción de está en la estructura y composición del material, o simplemente rellenando huecos o grietas. Como objetivo inicial se pretende verificar las posibilidades anteriores, establecer procedimientos de medida, y evaluar el grado de deterioro de las muestras seleccionadas.

- **Absorción de Agua:** En principio la medida de la absorción de agua, mientras que los morteros están sometidos a ciclos de hielo-deshielo, no puede considerarse una determinación del daño interno.

Si bien, el aumento de la absorción de agua es debido a la formación de fisuras y a la rotura de la red porosa del mortero; la profundidad del daño que esto representa está condicionada por la interconexión de la red de poros y de fisuras y por la propia capacidad del agua para moverse dentro de ésta.

Para la determinación de la absorción de agua se pesa inicialmente cada probeta, después del periodo de acondicionamiento establecido, y después periódicamente durante el desarrollo de los ciclos de hielo-deshielo.

En la Figura 2 aparecen los resultados de absorción de agua de los diferentes morteros, durante los ciclos de hielo deshielo. Se observa un aumento progresivo de la absorción en todos los morteros, observándose un mejor comportamiento en el mortero fabricado con el cemento CEM I 42,5. Por otra parte, los morteros que presentan peor comportamiento son los fabricados con cemento CEM IV/B (V), especialmente el que contiene ceniza volante con pérdida al fuego entre el 5% y el 7%.

(V) con ceniza volante de P.F. entre el 5% y el 7%) no pudieron medirse a partir de los 42 ciclos de hielo-deshielo, ya que se destruyeron totalmente.

Cambio de Longitud – Dilatación: El cambio de longitud

TABLA 4. GRADO DE DEGRADACIÓN DE LOS MORTEROS, DE ACUERDO CON LOS MÉTODOS CLÁSICOS DE ENSAYO.

CALIFICACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS MORTEROS MÉTODOS TRADICIONALES (DESPUÉS DE 56 CICLOS)			
	Poco o nada deteriorada	Medianamente deteriorado	Deterioro extendido al total
Absorción de agua		Mortero 1 Mortero B2	Mortero A2 Mortero B4 Mortero A4 ↓
Cambio de longitud	Mortero 1		Mortero B2 Mortero B4 Mortero A2 Mortero A4 ↓
Daño interno (RDM)	Mortero 1		Mortero B2 Mortero A2 Mortero B4 Mortero A4 ↓

Para su determinación se mide la longitud de las probetas, después de su acondicionado, y periódicamente durante el tiempo en que se realizan los ciclos de hielo-deshielo, con una precisión de milésima de milímetro. Calculándose la modificación de la longitud en tanto por ciento, con relación a la longitud inicial de cada probeta.

- **Modificación del Módulo Dinámico Relativo (RDM):** La modificación del módulo dinámico relativo se considera como una medida del daño interno producido por efecto de los ciclos de hielo-deshielo, ya que es un indicador de la formación progresiva de fisuras y huecos en la masa del mortero.

ister for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark



En la Figura 4 se recoge la modificación del RDM en los diferentes morteros a lo largo de los ciclos de hielo-deshielo. El menor daño lo presenta el Mortero 1, y las probetas más dañadas son las fabricadas con cemento CEM IV/B (V), fundamentalmente el tipo A (con ceniza volante de P.F. entre el 5% y el 7%).

Las probetas del Mortero A4 (fabricadas con CEM IV/B (V) con ceniza volante de P.F. entre el 5% y el 7%) y las fabricadas con el Mortero B4 (fabricadas con CEM II/B



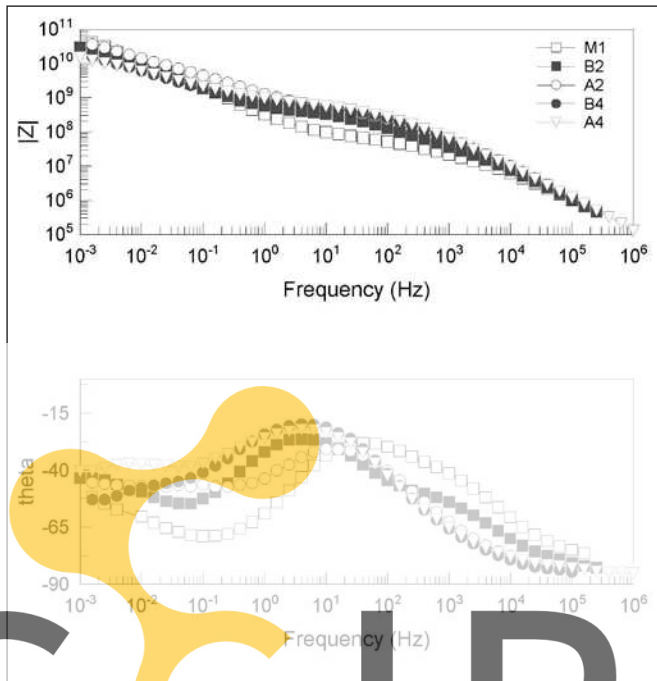


Figura 6. Módulo y fase de la impedancia en función de la frecuencia en el estado inicial.

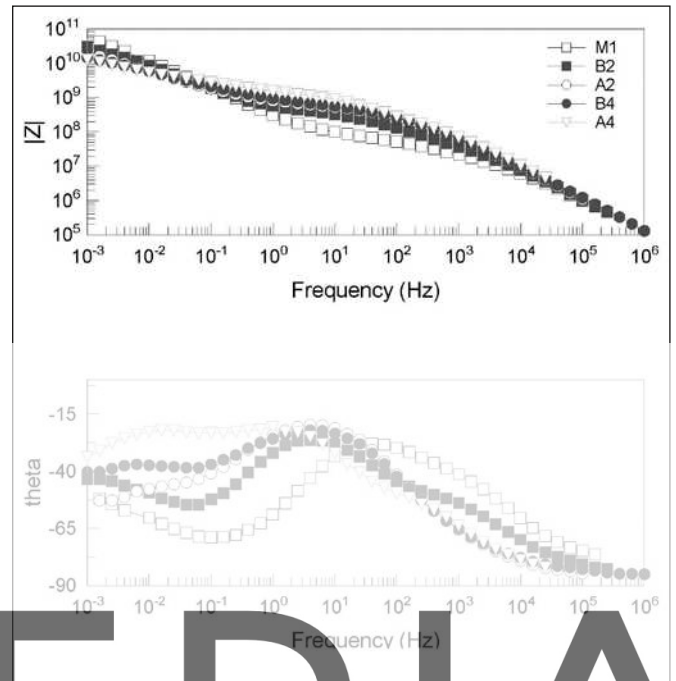


Figura 7. Módulo y fase de la impedancia en función de la frecuencia después de 7 ciclos hielo-deshielo.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

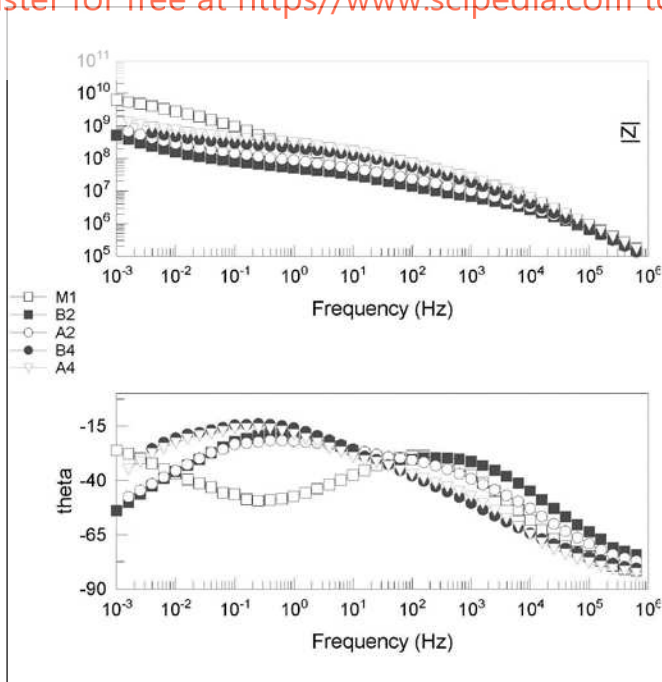


Figura 8. Módulo y fase de la impedancia en función de la frecuencia después de 14 ciclos hielo-deshielo.

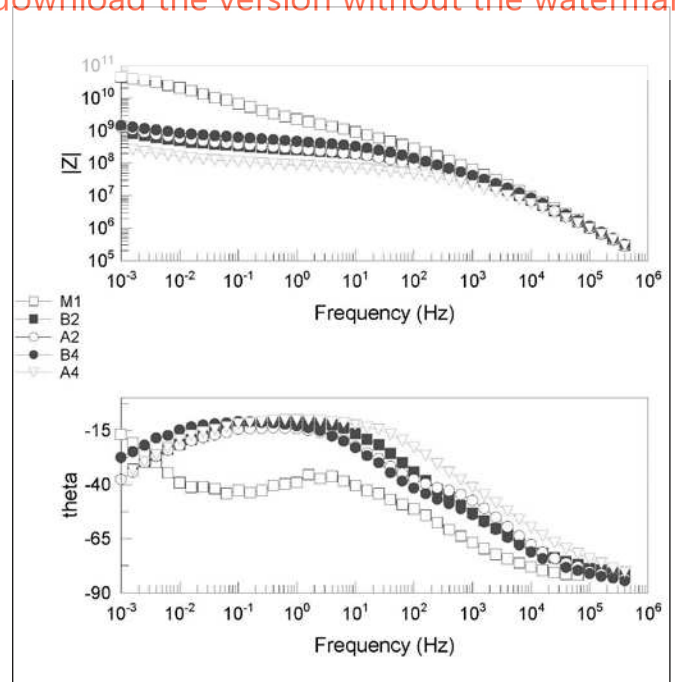


Figura 9. Módulo y fase de la impedancia en función de la frecuencia después de 42 ciclos hielo-deshielo.

(V) con ceniza volante de P.F. menor del 5%) no pudieron medirse por la falta de cohesión de las probetas y la rugosidad de la superficie de medida.

En la Tabla 4 se recoge un resumen de estos resultados. Se observa que el mortero con mayor alteración la calificación es similar en todos los métodos de ensayo. Sin embargo, no es posible identificar claramente con técnicas convencionales la gradación del daño en los morteros con dosificaciones intermedias de ceniza volante. Por su parte, los morteros con menor alteración (fabricado con Portland) presenta, también, diferente calificación en función del método de ensayo.

- **Espectroscopia de impedancia:** El análisis de los morteros mediante espectroscopia de impedancia pretende identificar el grado de deterioro interno del material, observando la modificación del comportamiento, no solo por la aparición de fisuras y modificación de la red porosa, sino también por la evaluación de la situación de los morteros a nivel de bordes de grano y de fase acuosa presente en el material.

Se analizaron muestras de los diferentes morteros, midiéndose éstas periódicamente durante los ciclos de hielo-deshielo, a los que han estado sometidos. Se han caracterizado las muestras inicialmente y transcurridos varios ciclos de hielo-deshielo. A partir de 42 ciclos no es posible realizar medidas en todos los morteros, ya que algunas de ellas presentaban una importante disgregación. En todos los casos se observa la diferencia de los resultados obtenidos en los morteros con cenizas, en relación con el Mortero 1, fabricado con cemento Portland, sin cenizas. Las muestras fueron medidas en un amplio rango de frecuencias entre 10 y 100 kHz, con una tensión de excitación muy pequeña (10 mV) para evitar alterar las medidas (22-26). Las condiciones ambientales se mantuvieron constantes en todo el proceso de medida, con temperaturas entre 22 y 24 °C, y humedad ambiente del 50 %. Los datos obtenidos, se procesaron con ayuda del software ZView2 y software desarrollado por los autores, intentando por una parte separar efectos asociados a cada una de los procesos presentes en la muestra, y por otra determinar el comportamiento eléctrico y el circuito equivalente asociado.

La Figura 5 es un exponente del tipo de estudios realizados. En ella pueden verse representaciones en el plano complejo de Z , Y , M , y sus normalizaciones con la frecuencia. De esta forma, pueden separarse los fenómenos asociados a altas frecuencias a partir de la representación de M e Y y bajas frecuencias con los valores de Z , pudiendo interpretarse en ellos las modificaciones sufridas por los morteros, debido a la acción de los ciclos de hielo-deshielo. Aunque la información a partir de los diferentes tipos de representaciones es complementario y haremos uso de él en la interpretación de los resultados, nos limitaremos a presentar estos en forma de módulo de la impedancia y fase en función de la frecuencia que son los que permiten una mejor visualización de la evolución del fenómeno que estamos estudiando.

En las Figuras 6, 7, 8 y 9, se representa los valores de

módulo y fase de la impedancia para las muestras en el estado inicial, y sometidas a 7, 14 y 42 ciclos respectivamente. En las muestras sometidas a 7 ciclos, ya se pone de manifiesto el inicio del deterioro de las muestras. Este es más evidente en la muestra A4, y menos en la B2. Por su parte, las muestras A2 y B4 muestran un comportamiento similar intermedio a los dos anteriores. Para 14 ciclos, la respuesta eléctrica, con la variación en la curva de fase, y la disminución en los valores de impedancia en las muestras con cenizas, pone de manifiesto un nivel muy elevado de deterioro en todas ellas. Únicamente la muestra de referencia mantiene los parámetros, indicando un bajo nivel de deterioro. Por encima de este valor de ciclos las muestras se pueden considerar ya deterioradas, y para 42 ciclos, se inicia el deterioro del Mortero 1, fabricado con cemento CEM I (sin adición de ceniza volante).

Analizando las curvas de la fase y el módulo de la impedancia frente a la frecuencia se puede observar una importante sensibilidad para identificar y analizar el grado de deterioro de los morteros por la acción de los ciclos de hielo-deshielo.

CONCLUSIONES

Con las diferentes técnicas aplicadas, se ha demostrado, que los morteros con cenizas más porosas (pérdida al fuego entre 5% y 7%) y mayor contenido, son las que presentan un mayor grado de deterioro, mientras que los fabricados con cenizas más densas y con menor contenido están menos deterioradas. Las otras composiciones, correspondientes a morteros fabricados con altos contenidos de cenizas densas, o bajos contenidos de cenizas porosas, dan resultados similares entre sí.

Se ha verificado la potencialidad de la técnica de espectroscopia de impedancias complejas para estudiar estos fenómenos, y ampliar la información sobre el estado del material. Siendo capaz de analizar con gran sensibilidad la evolución del daño producido en los morteros por efecto de los ciclos de hielo-deshielo desde etapas muy tempranas del proceso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del MEC (project MAT2007-66845-C02-02) y de la acción 139/Q06 0915-110 financiada conjuntamente por CAM-UPM

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Vision 2020. A Vision for the Concrete Repair Protection and Strengthening Industry*. Strategic Development Council (SDC) (oct-2004)
- [2] Mehta P K, Burrows R W. *Building Durable Structures in the 21st Century*. Concrete International, 2001, 23 (3) : 57-61
- [3] CHEN Yueshun, WEI Juff, ZHAO Xiaolong. *Description of Concrete Durability Damage Process* WUJNS Wuhan University Journal of Natural Sciences. Vol 11, n°3, 653-656 (2006)
- [4] Fred Goodwin. *Renovation of the Concrete Repair Industry*. Concrete Repair Bulletin, 12-17, 2008
- [5] Tanya Wattenburg Komar. *Concrete Repair in the New Century*. Concrete Repair Bulletin, 18-22, 2008

- [6] Kumar Mehta, P. *Concrete, Structure, Properties, and Materials*. Ed. Prentice-Hall, Inc. Englewood. New Jersey 1986.
- [7] Jingyao Cao and D. D. L. Chung. *Damage evolution during freeze-thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement*. Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 10, 1657-1661, October 2002.
- [8] Menéndez, E. "Métodos de ensayo para la determinación de la resistencia de los materiales de construcción a los ciclos de hielo-deshielo. *Cemento y Hormigón*. Vol. n 871, pp. 4-16 (2005).
- [9] Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Cold Wheater Concrete. Durability Pooled Fund Study. www.crrrel.usace.army.mil. (2005)
- [10] RILEM TC 176-IDC. *Internal Damage of Concrete Due to Frost Action. Recommendation of RILEM TC 176-IDC: Test methods of frost resistance of concrete*. Noviembre 2001.
- [11] Küknel, Radko A. *Cause and consequence: volume changes behind building material determination*. Materials Characterization. 53, 171-180 (2004).
- [12] E. Menéndez and J. de Frutos, *Ion Monitoring Solutions in Cements Using Electrical Spectroscopy*, Rev. Mex. Fis. 55(4) 2009
- [13] C.A. Scuderi, T.O. Mason, H.M. Jennings, *Impedance spectra of hydrating cement pastes*, J Mater Sci 26 (1991) 349– 353.
- [14] M. Keddarn, H. Takenouti, X.R. Novoa, C. Andrade, C. Alonso, *Impedance measurements on cement paste*, Cem Concr Res 27 (1997) 1191– 1201.
- [15] W.J. McCarter, R. Brousseau, *The AC response of hardened cement paste*, Cem Concr Res 20 (1990) 891– 900.
- [16] P. Gu, Z. Xu, J.J. Beaudoin, *Application of AC impedance techniques in studies of porous cementitious materials: I. Influence of solid phase and pore solution on high frequency resistance*, Cem Concr Res 23 (1993) 531– 540.
- [17] B.J. Christensen, R.T. Coverdale, R.A. Olson, S.J. Ford, E.J. Garboczi, H.M. Jennings, T.O. Mason, *Impedance spectroscopy of hydrating cement-based materials: measurement, interpretation, and application*, J Am Ceram Soc 77 (1994) 2789–2804.
- [18] C. Andrade, L. Soler, J. de Frutos. *Dielectric properties of cement paste and its relationship with low water content* Bol. Soc. Cer. Vid., 34(5-6), (1995).414-417
- [19] H.W. Whittington, J. McCater, M.C. Forde, *The conduction of electricity through concrete*, Mag Concr Res 33 (1981) 48–60.
- [20] J. de Frutos, L. Soler, C. Andrade. *Dielectric properties of concrete paste with low content of free water* Bol. Soc. Cer. Vid 38 (6) (1999) 607-610
- [21] P. Gu, P. Xie, Y. Fu, J.J. Beaudoin, *AC impedance phenomena in hydrating cement systems: frequency dispersion angle and pore size distribution*, Cem Concr Res 24 (1994) 86–88.
- [22] D.E. Macphee, D.R. Sinclair, S.L. Cormack, *Development of an equivalent circuit model for cement pastes from microstructural considerations*, J Am Ceram Soc 80 (1997) 2876– 2884.
- [23] S.L. Cormack, D.E. Macphee, D.R. Sinclair, *An AC impedance spectroscopy study of hydrated cement pastes*, Adv Cem Res 10 (1998) 151– 159.
- [24] J De Frutos, M.L. Calzada, E. Menéndez *A study of ionic defects in modified lead titanate ceramics* J. Mat Sci, 30 (11) (1995) 2866-2872
- [25] S.J. Ford, J.H. Hwang, J.D. Shane, R.A. Olson, G.M. Moss, H.M. Jennings, T.O. Mason, *Dielectric amplification in cement pastes*, Adv Cem Based Mat 5 (1997) 41–48.
- [26] G. Song, *Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete/* Cement and Concrete Research 30 (2000) 1723–1730
- [27] D.A. Koleva, K. van Breugel, J.H.W. de Wit, E. van Westing, O. Copuroglu, L. Veleva, A.L.A. Fraaij *"Correlation of microstructure, electrical properties and electrochemical phenomena in reinforced mortar. Breakdown to multi-phase interface structures. Part I: Microstructural observations and electrical properties"*. Materials Characterization 59 290–300 (2008)
- [28] Koleva, D.A.; de Wit, J.H.W.; van Breugel, K., Veleva, L.P.; van Westing, E.; Copuroglu, O.; Fraaij, A.L.A. *Correlation of microstructure, electrical properties and electrochemical phenomena in reinforced mortar. Part II: Pore network, electrical properties and electrochemical response*. Materials Characterization 59. 801-816 (2008).

Recibido: 5-7-09
Aceptado: 14-10-09

SCIPEDIA

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark